

## **Разработка математической модели процесса поверхностного наклепа ударами шариков**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт»*

Проведено моделирование процесса поверхностного наклепа ударами шариков в зависимости от скорости удара, диаметра шарика и кратности удара. Исследовано влияние кратности удара на показатель поверхностной многоударной деформации. Определена зависимость сжимающих напряжений в поверхностном слое от скорости удара шариком.

**Ключевые слова:** модель процесса поверхностного наклепа, динамическое упрочнение, скорость удара, диаметр шарика, кратность удара, показатель поверхностной деформации, сжимающие напряжения.

### **1. Введение**

Повышение надежности тяжелонагруженных деталей представляет собой одну из наиболее важных и актуальных проблем в машиностроении. Наиболее перспективно решение этой проблемы путем привлечения технологических методов, создания благоприятной технологической наследственности, обеспечения параметров качества поверхностного слоя на уровне, соответствующем максимальному повышению требуемой совокупности эксплуатационных свойств изделий.

Прогрессивным видом обработки в технологии машиностроения является поверхностное пластическое деформирование (ППД). В результате обработки ППД снижается шероховатость и создается поверхностный наклепанный слой со сжимающими остаточными напряжениями и повышенной твердостью. Несомненным достоинством ППД – возможность создания упрочненного поверхностного слоя, в котором обеспечивается плавность перехода от упрочненного к неупрочненному материалу, что исключает его отслаивание.

Все известные многочисленные способы обработки ППД подразделяют на статические и динамические. Статические способы обработки ППД наиболее изучены. Более полное и широкое использование динамической энергии при упрочнении ППД сдерживается сложностью описания процессов, происходящих при ударе.

*Ударно-барабанная обработка* – ППД соударением закрепленных в барабане заготовок с рабочими телами, падающими вследствие его вращения (ГОСТ 18295-72).

На промышленных ударно-барабанных установках серии УБЯ упрочнение выполняется путем соударения падающих шариков с обрабатываемой поверхностью детали, закрепленной в барабане, вращающемся вокруг оси. Возможность стабильного получения малых энергий соударения обеспечивает в этом случае напряженное состояние упрочненной поверхности детали, не приводящее к недопустимым деформациям. Простота оборудования и универсальность технологии являются отличительными особенностями ударно-барабанного упрочнения, многократно повышающего малоцикловую выносливость деталей.

## **2. Существующие методики определения НДС при динамическом упрочнении**

Методика определения диаметра отпечатка по известному диаметру и скорости удара шарика и известным свойствам обрабатываемого материала разработана М.М. Савериным [6]. Эта методика нашла широкое распространение и применяется авторами книг [3, 4, 7], посвященных упрочняющей обработке.

К недостаткам методики следует отнести необходимость определения специфичных свойств материалов, таких как истинная динамическая твердость и показатель динамического упрочнения. Для определения данных динамических свойств следует провести специальные эксперименты для каждого исследуемого материала.

Исчерпывающая методика определения НДС обрабатываемой детали, рекомендации по контролю обработки, методика расчета времени обработки для пневмодинамического метода упрочнения разработаны Б.П. Рыковским [5]. Эта методика принята в качестве инженерной методики, так как носит наиболее общий характер и является наиболее полной.

Из недостатков следует отметить применение методики определения диаметра отпечатка по специальным механическим свойствам, требующей ряда экспериментальных исследований для новых материалов. В полной мере определить НДС согласно данной методике можно лишь для алюминиевого сплава Д16Т.

## **3. Математическая модель процесса поверхностного наклепа ударами шариков**

Обработка ударами шариков характеризуется локальностью пластического деформирования поверхности детали. В результате силового воздействия деформирующей среды на поверхности создаются лунки, обуславливающие определенное НДС по толщине. При полном покрытии поверхности отпечатками можно предположить, что сжатие всех слоев по толщине в среднем будет соответствовать деформациям осевого сжатия под одним отпечатком. При деформированном состоянии каждого слоя нетрудно определить изменение формы и размеров заготовки в целом.

При обработке ППД осуществляется сложное нагружение. Последующие удары вблизи каждого отпечатка приводят к перераспределению деформаций таким образом, что при отсутствии объемных изменений размеры детали в среднем при полном укрытии поверхности отпечатками оказываются неизменными.

Геометрическая модель представляет собой пластину толщиной  $H_1$  и радиусом  $R_1$  и шарик диаметром  $D = 2R$  (рисунок 1, а).

Конечно-элементная сетка генерируется средствами программы Abaqus и необходима для реализации расчета МКЭ. Размер элемента задается пользователем. По рекомендации [1] выбраны элементы RAX2 и CAX4R (рисунок 1, б).

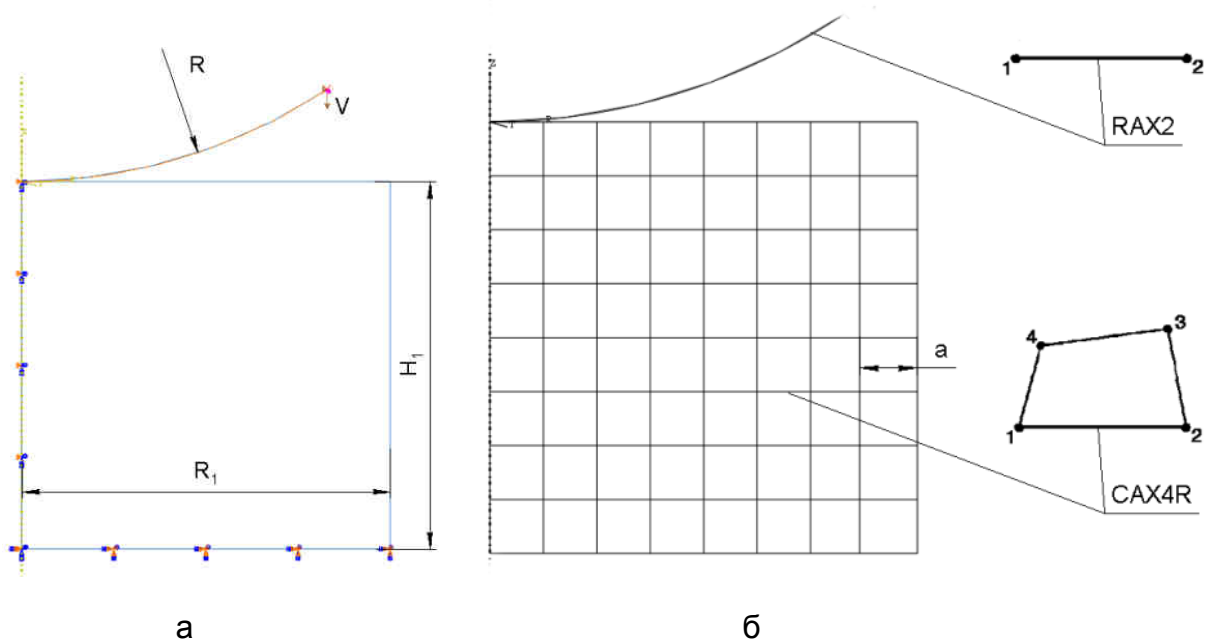


Рис. 1 – Модель одиночного удара шариком: а – 2D-геометрическая модель и граничные условия; б – конечно-элементная модель и типы конечных элементов

Типы конечных элементов, используемые при моделировании, для применения в осесимметричной плоской постановке:

- RAX2 2-узловой линейный осесимметричный жесткий элемент;
- CAXR4R 4-узловой билинейный осесимметричный квадратичный элемент (редуцированная интеграция);

Граничные условия (см. рисунок 1, а):

- на вертикальной грани модели пластины задано условие симметрии;
- горизонтальная грань жестко закреплена;
- в произвольной точке шарика задается скорость  $V$ .

Начальные условия:

- в модели отсутствуют начальные напряжения и деформации при моделировании однократного удара;
- в модели присутствуют напряжения и деформации, образованные на этапе предыдущего нагружения для многократных ударов.

Упрощения, принятые при моделировании:

- шарик является абсолютно жестким телом;
- тепловые процессы от пластического деформирования и контактного трения не учитывают;
- горизонтальную составляющую вектора скорости шарика не учитывают;
- пластина сплошная, однородная с изотропными механическими свойствами.

Свойства материалов задают в табличной форме в соответствующих настройках модели в системе AbaqusCAE. Физико-механические характеристики и коэффициенты трения материалов, применяемых при моделировании, приведены в таблицах 1–3.

Таблица 1 – Физические свойства моделируемых материалов

Марка материала	Плотность $\rho, \text{кг} / \text{м}^3$	Модуль Юнга $E, \text{ГПа}$	Коэффициент Пуассона $\mu$
Д16Т	2770	72	0,34
30ХГСА	7840	210	0,28
ВТ-22	4620	110	0,32
Стекло	2700	-	-
ШХ15	7840	-	-

Таблица 2 – Коэффициенты трения скольжения пар трущихся материалов

Трущиеся пары материалов (насухо)	Коэффициент трения $k_{mp}$
30ХГСА - ШХ15	0,07
Стекло - 30ХГСА	0,03
ШХ15 - Д16Т	0,12

Таблица 3 – Механические свойства моделируемых материалов

Марка материала	Предел временной прочности $\sigma_e, \text{МПа}$	Предел текучести $\sigma_T (\sigma_{02}), \text{МПа}$	Относительное удлинение при разрыве $\delta_e$
Д16Т	490	320	0,15
30ХГСА	1100	830	0,20
ВТ-22	1250	950	0,10

В рамках исследования варьируют следующие параметры:

1. Материал пластины согласно таблице 1:  
- алюминиевый деформируемый сплав Д16Т ГОСТ 4784-97;  
- конструкционная сталь 30ХГСА ГОСТ 4543-71;  
- деформируемый титановый сплав ВТ-22 ГОСТ 19807-91.
2. Диаметр шариков  $D = 4; 5; 6; 7; 8 \text{ мм}$  согласно производственной инструкции ПИ 949-69 «Поверхностное упрочнение деталей из алюминиевых сплавов».
3. Материал шариков:  
- сталь подшипниковая ГОСТ 801-78 для упрочнения сплавов 30ХГСА и Д16Т;  
- стекло силикатное ТУ 8825-95 для упрочнения сплава ВТ-22 с целью предотвращения межкристаллитной коррозии.
4. Толщина пластины согласно рекомендациям [7]:  
 $H_1 = 2,0 \text{ мм}$  – для материала Д16Т;  
 $H_1 = 1,3 \text{ мм}$  – для материалов 30ХГСА и ВТ-22.
5. Скорость удара шариков  $V = 1; 3; 5; 7; 9 \text{ мм}$ , что соответствует диапазону скоростей промышленных ударно-барабанных установок серии УБЯ.

Результатом моделирования является эпюры НДС пластины. Для наглядности на рисунке 2 показан пример результатов моделирования при диаметре шарика 6 мм, скорости удара 5 м/с для материала Д16Т.

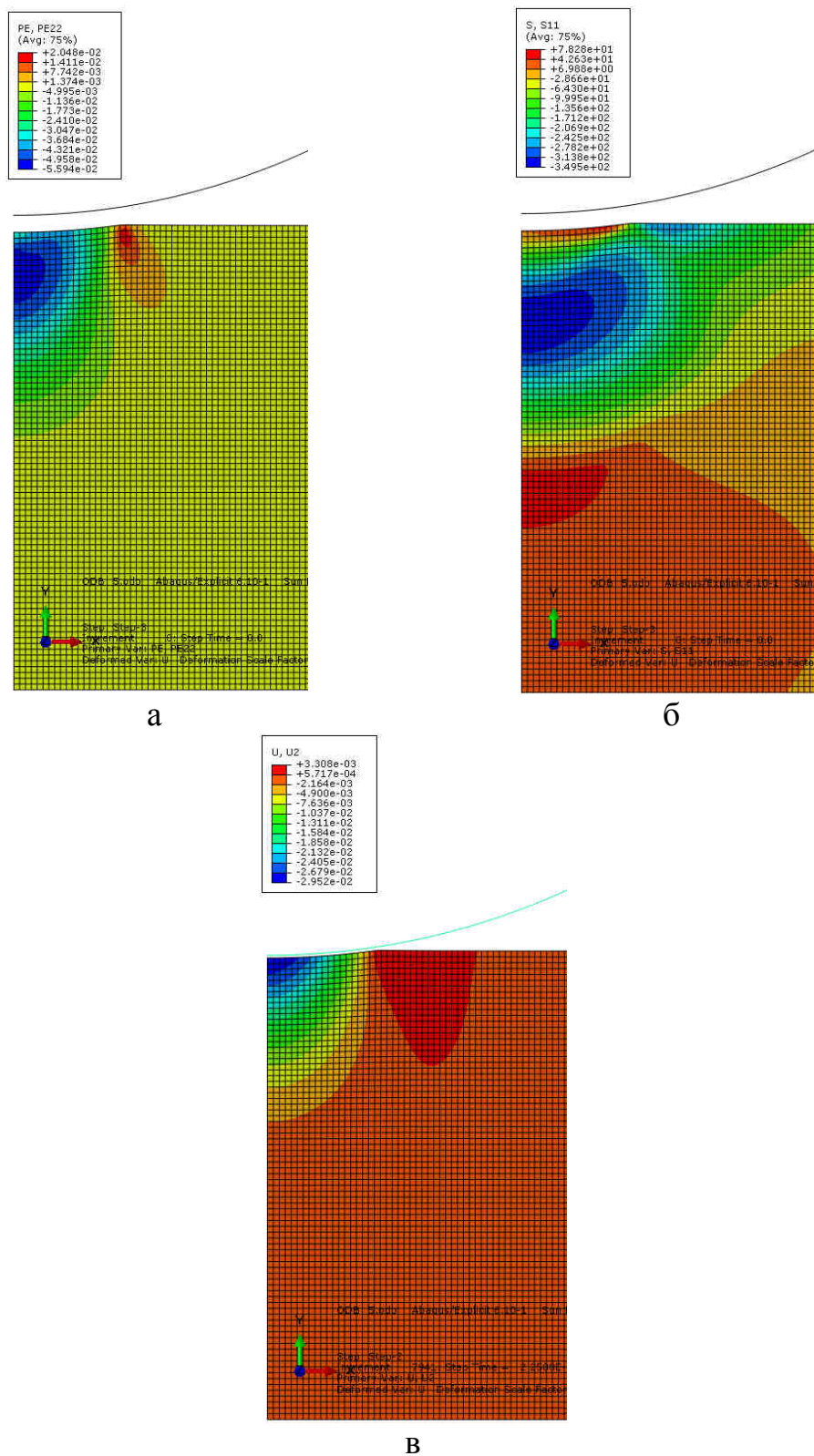
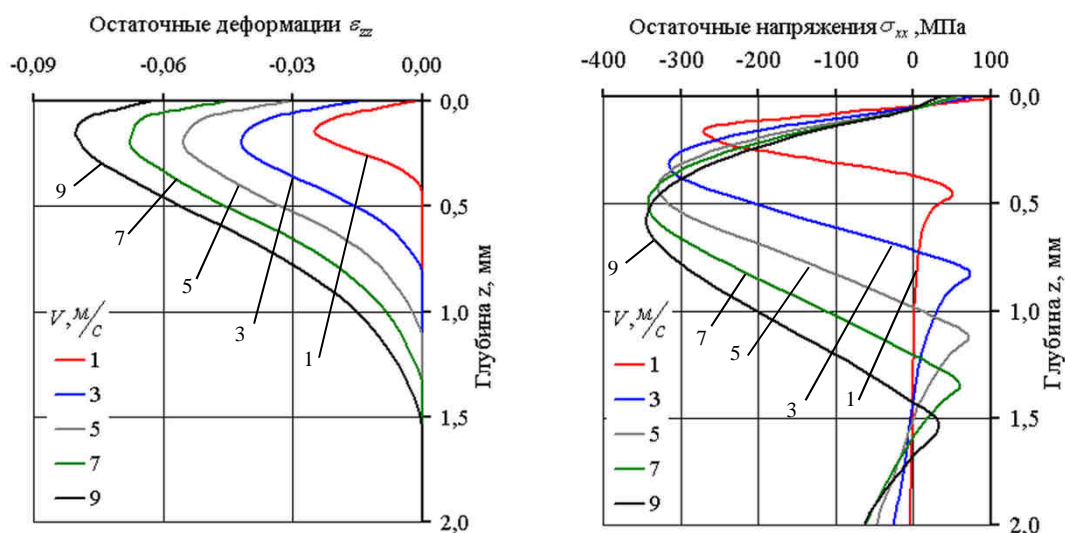


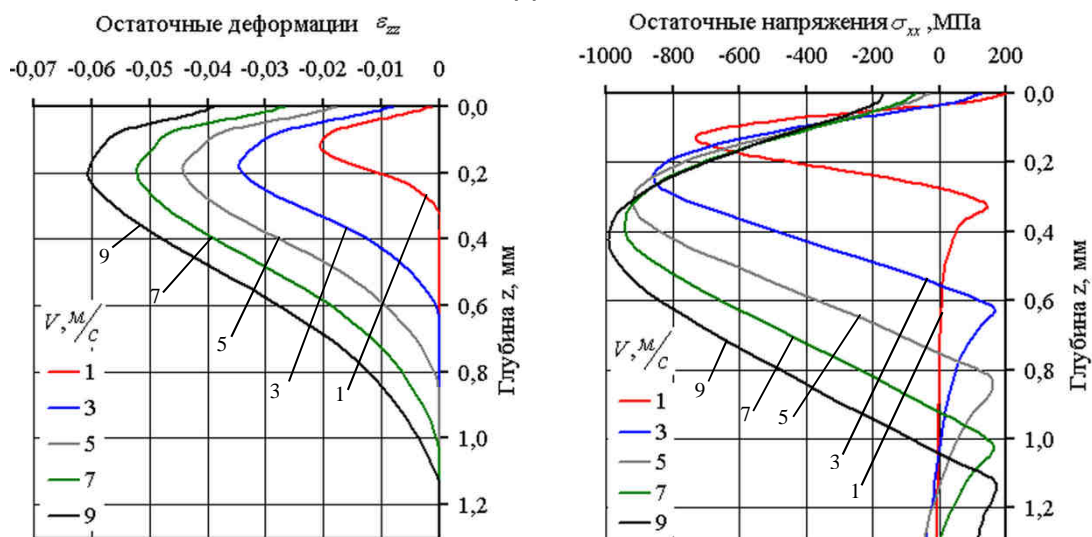
Рис. 2 – НДС пластины: а – деформации  $\varepsilon_{zz}$ ; б – напряжения  $\sigma_{xx}$ , МПа;

в – перемещения вдоль оси z

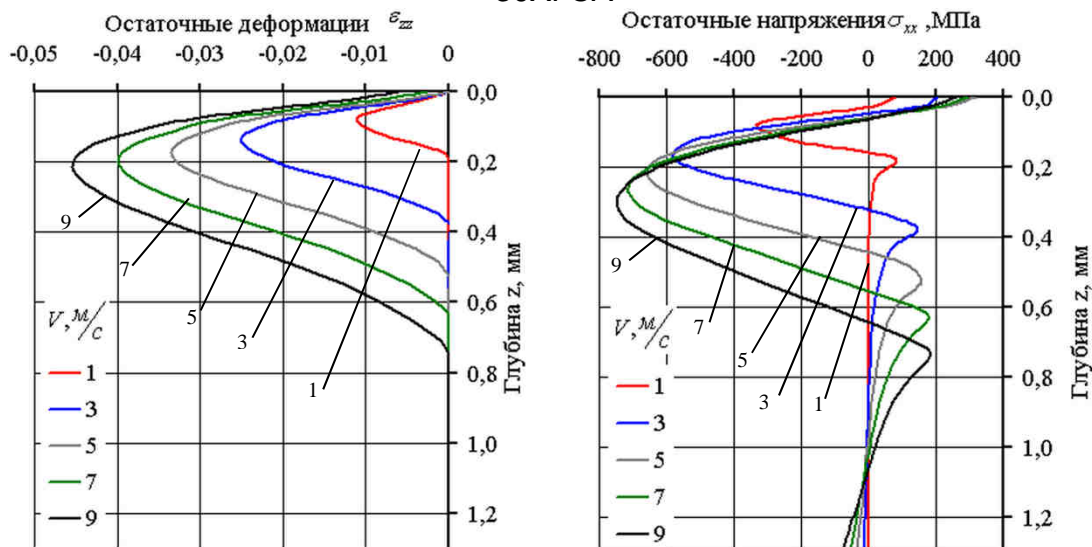
Для проведения анализа эпюры показаны в виде графиков (рисунки 3–5).



D16T



30ХГСА



ВТ-22

Рис. 3 – Эпюры НДС пластины из моделируемых материалов при диаметре шарика 6 мм в зависимости от скорости удара



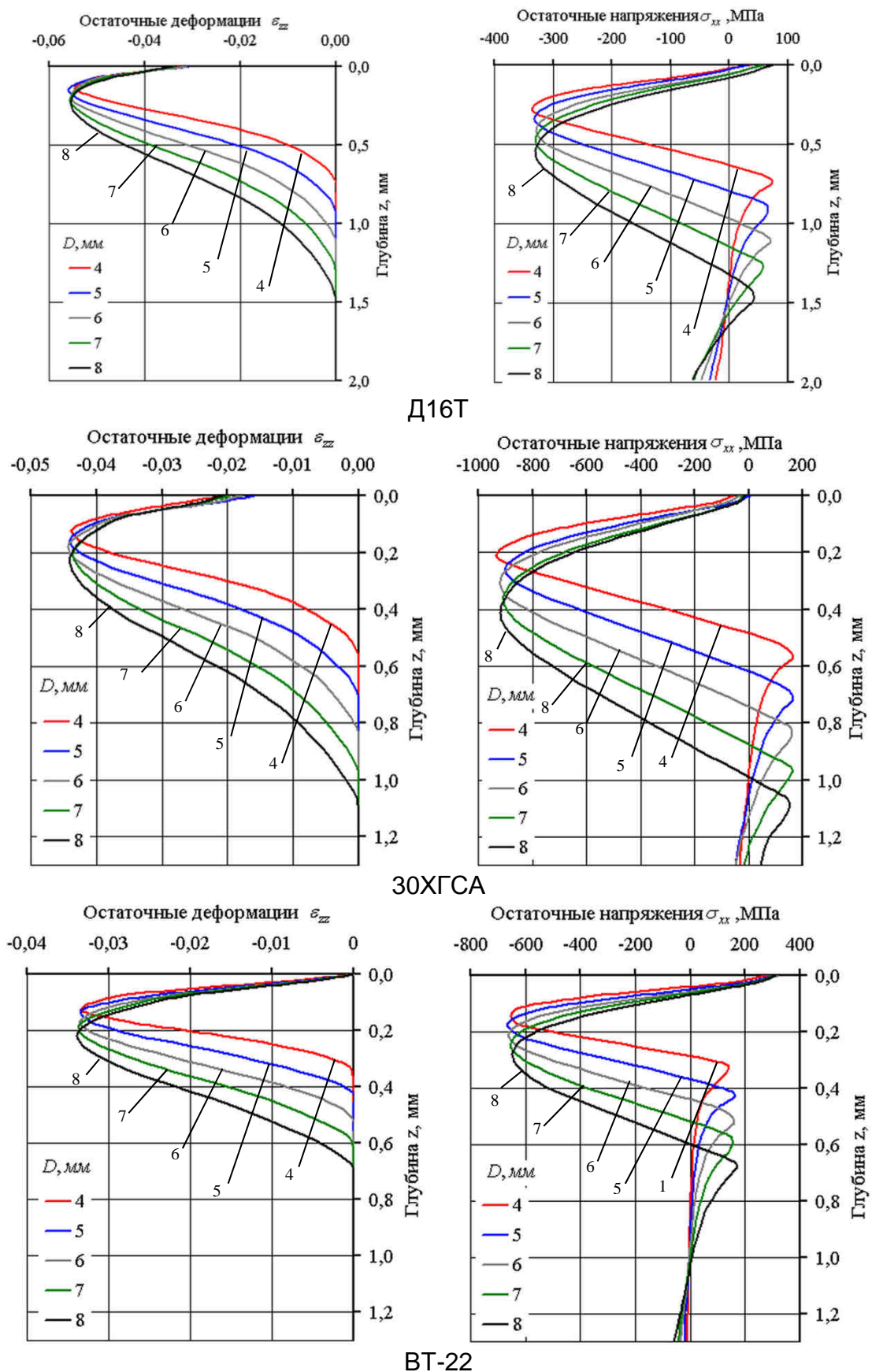
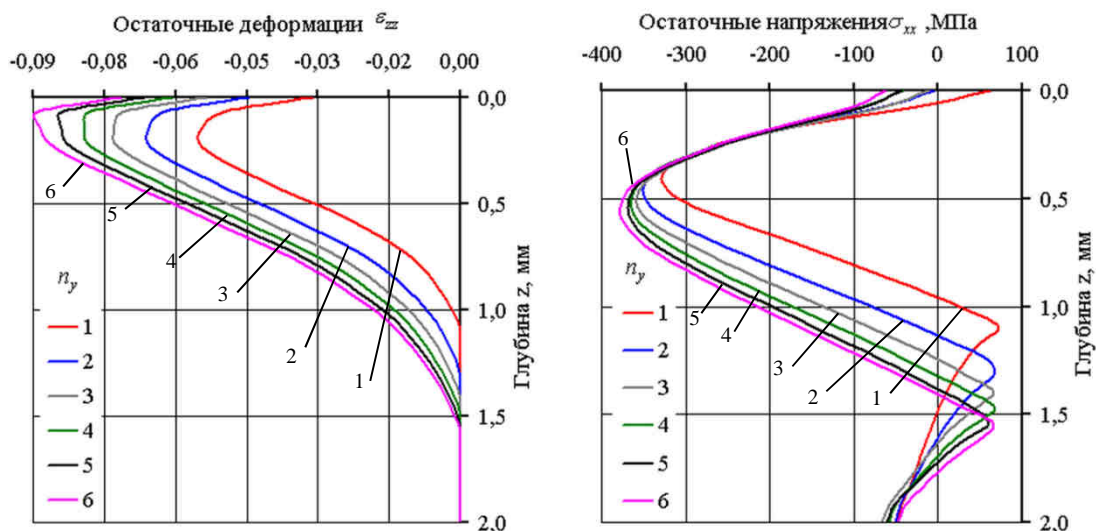
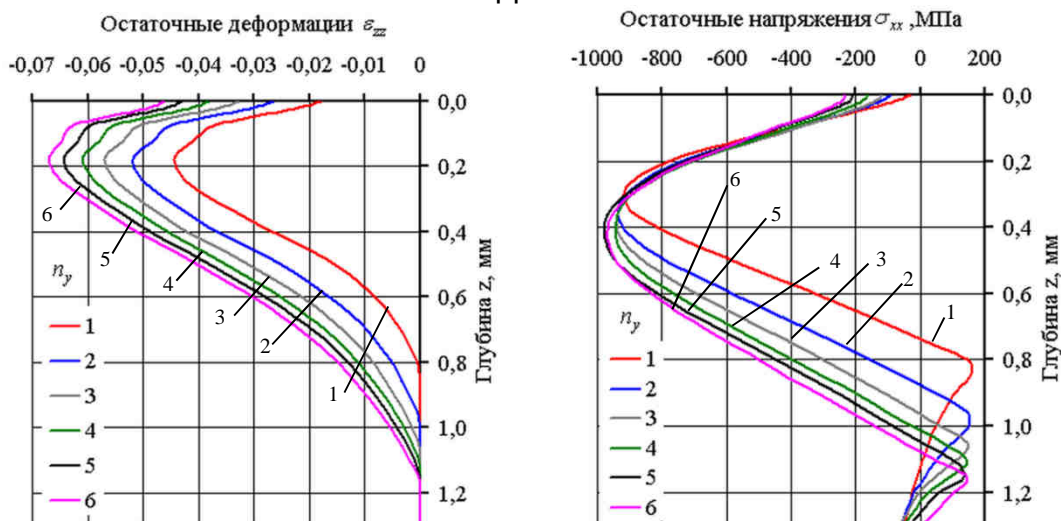


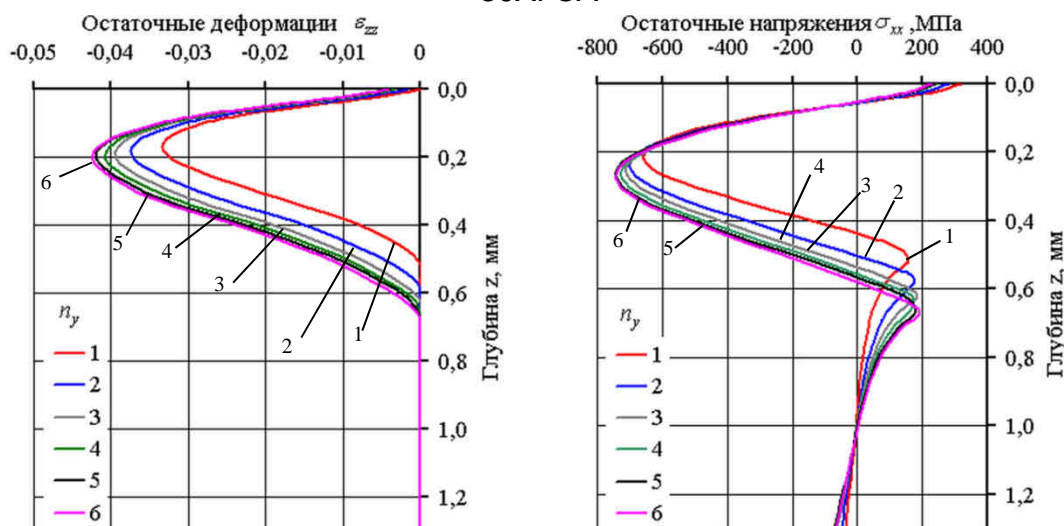
Рис. 4 – Эпюры НДС пластины из моделируемых материалов при скорости удара 5 м/с в зависимости от диаметра шарика



D16T



30ХГСА



ВТ-22

Рис. 5 – Эпюры НДС пластины из моделируемых материалов при скорости удара 5 м/с и диаметре шарика 6 мм в зависимости от кратности удара



#### 4. Анализ результатов моделирования

##### Определение показателя поверхностной деформации при одиночном ударе шариком

Из параметров деформированного состояния наибольший интерес для процессов упрочняющей обработки ППД представляют степень поверхностной деформации, толщина пластически деформированного слоя в наиболее характерной – осевой зоне вдавливания шарика.

После аппроксимации полученных данных методом наименьших квадратов можно получить зависимости, показанные на рис. 6.

Параметр  $h/d$  как показатель степени остаточной деформаций в лунке и критерий геометрического подобия остаточных отпечатков используют при сравнении очага деформации материалов с различными упругопластическими свойствами или с различными условиями деформирования (рисунок 6).

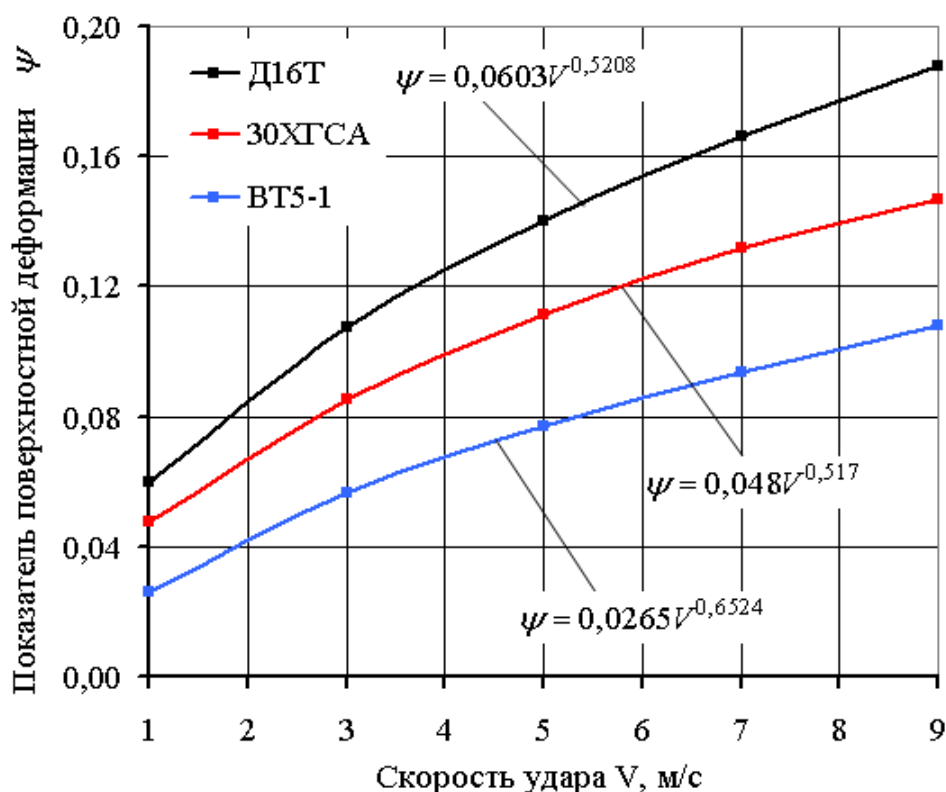


Рис. 6 – Зависимость показателя поверхностной деформации  $\psi$  при однократном ударе от скорости удара шарика для моделируемых материалов

Для конкретных материалов и условий обработки отношение  $h/d$  определяется критерием  $d/D$ , который и принимают в качестве основного показателя деформированного состояния поверхности при исследовании силовых факторов поверхностного наклепа.

Проанализировав результаты, можно сделать выводы:

1. Для одинаковых скоростей удара показатель поверхностной деформации для Д16Т заметно больше, чем для 30ХГСА и ВТ-22.
2. При увеличении скорости удара показатель поверхностной деформации для Д16Т возрастает сильнее, чем для 30ХГСА и ВТ-22.

### Обеспечение равномерности покрытия поверхности отпечатками

При обработке ударно-барабанным методом расходным параметром устройства является количество шариков, приходящееся на единицу площади поверхности детали  $q$ . При этом поток шариков является дискретным, а не непрерывным. За один оборот установки наносится определенное количество отпечатков.

Вероятность  $P(m_i)$  обработки  $m_i$  ударами некоторого участка выражается законом Пуассона и определяется в виде

$$P(m_i) = \frac{n_y^{m_i}}{m_i!} e^{-n_y}, \quad (1)$$

где  $n_y = qt\Delta S$  – параметр Пуассона, характеризующий математическое ожидание или среднеевероятное количество ударов на участке  $\Delta S$  упрочняемой поверхности.

Показатель поверхностной деформации  $\psi$  оценивается соотношением

$$\psi = \frac{d}{D}, \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр отпечатка;

$D$  – диаметр шарика.

При многоударном контактом деформировании происходит увеличение диаметра отпечатка. Величина  $K_y$  представляет собой отношение

$$K_y = \frac{\psi_{n_y}}{\psi} \quad (3)$$

где  $\psi_{n_y}$  – показатель поверхностной деформации при многократном ударе.

По результатам моделирования строится график влияния кратности удара шарика на показатель поверхностной многоударной деформации  $K_y$  (рисунок 7).

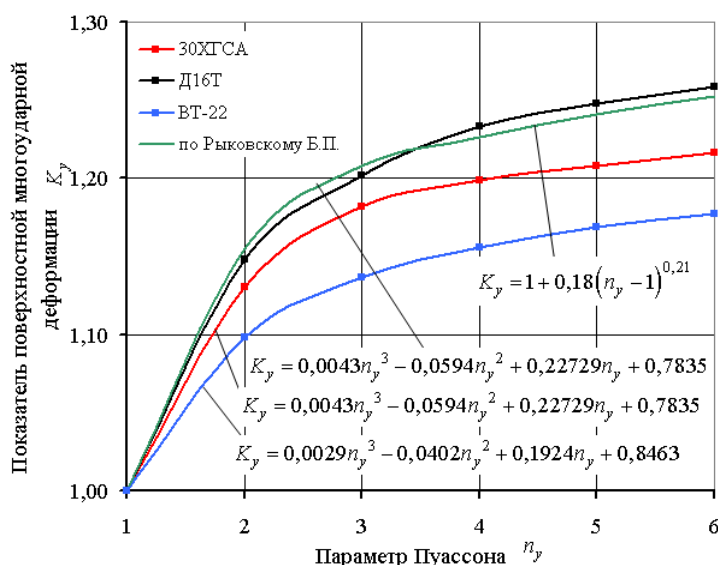


Рис. 7 – Изменение показателя поверхностной многоударной деформации  $K_y$  в зависимости от кратности удара для моделируемых материалов

Анализ результатов показывает следующее:

1. При одних и тех же скоростях удара показатель поверхностной многоударной деформации для сплава Д16Т больше, чем для материалов 30ХГСА и ВТ-22.
2. При увеличении параметра Пуассона показатель поверхностной многоударной деформации для Д16Т возрастает сильнее, чем для 30ХГСА и ВТ-22.

### **Определение напряжений, вносимых обработкой**

Напряжения в поверхностном слое при динамическом упрочнении ударами шариков играют значительную роль.

По результатам моделирования строят график зависимости сжимающих напряжений в поверхностном слое от скорости удара шариком (рисунок 8).

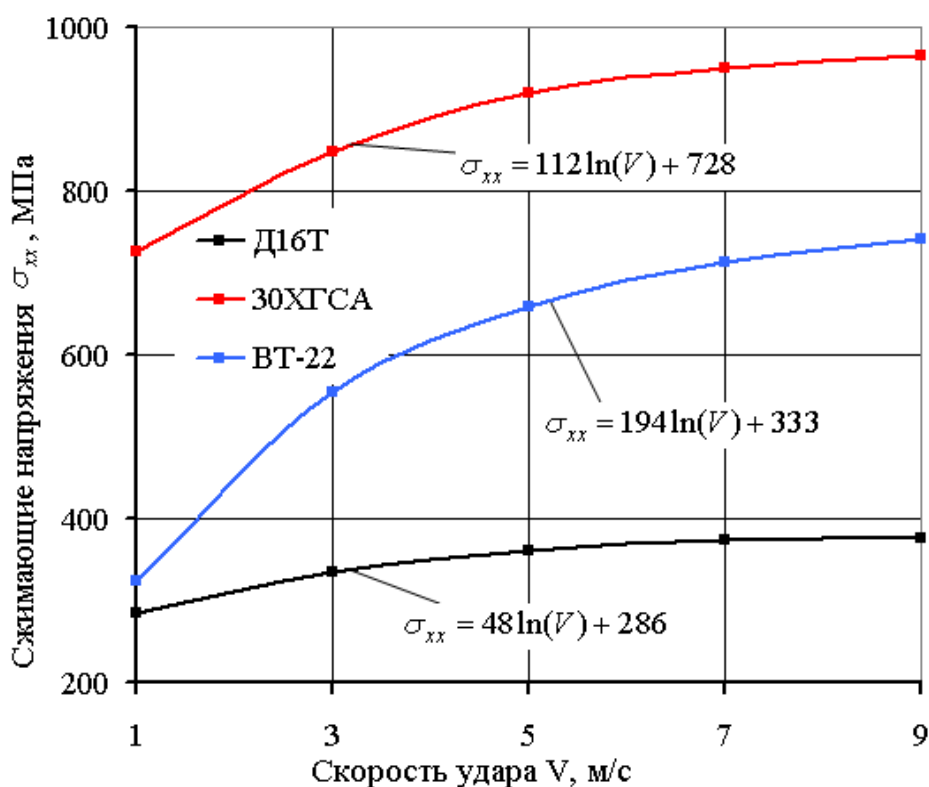


Рис. 8 – Зависимость сжимающих напряжений в поверхностном слое от скорости удара шариком

Проанализировав результаты, можно сделать выводы:

1. Напряжения в поверхностном слое с увеличением скорости наибольшие для стали 30ХГСА и наименьшие – для алюминиевого сплава Д16Т.
2. Зависимость вносимых сжимающих напряжений от скорости удара шариком возрастает незначительно для Д16Т и значительно – для 30ХГСА и ВТ22.

### **Общие выводы**

1. Упрочнение несопрягаемых поверхностей силовых деталей методом поверхностно-пластического деформирования является эффективным методом повышения ресурса авиационных конструкций.

2. Математическое моделирование процесса динамического упрочнения ударом шариков позволяет глубже изучить явления, происходящие в материале при обработке, более точно оценить глубину пластически деформированного слоя и остаточные напряжения, вносимые упрочняющей обработкой.

3. Разработанная математическая модель позволяет определить параметры НДС для распространенных авиационных материалов, минуя многочисленные эксперименты.

### Список литературы

1. Гребеников, А.Г. Анализ напряженно-деформированного состояния авиационных конструкций с помощью системы Ansys [Текст] : . Учебное пособие ч. 1 / А.Г. Гребеников, С.П.Светличный, В.Н.Король В.Н., В.Н. Анпилов. – Х.: ХАИ, CADFEM, 2002.– 376 с.

2. Карпов, Я.С. Авиационное материаловедение. Часть 1. Металлы и сплавы [Текст] / Я.С. Карпов, П.П. Лепихин, В.В. Остапчук, Н.Д. Сазоненко, Н.И. Семишов – Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», 2004– 318 с.

3. Киричек, А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. – М.: Машиностроение, 2004.– 274 с.

4. Технологія виготовлення деталей літальних апаратів з видаленням припуску [Текст] : підручник/ В. С. Кривцов, В. Т. Сікульський, Ю. В. Д'яченко та ін. – Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», 2010. – 224 с.

5. Рыковский, Б.П., Смирнов В.А., Щетинин Г.М. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом [Текст] / Б.П. Рыковский, В.А. Смирнов, Г.М.Щетинин. – М.: Машиностроение, 1985.– 283 с.

6. Дробеструйный наклеп [Текст] / М.М.Саверин – М: Машгиз, 1954.– 203 с.

7. Строганов, Г.Б. Технологическое обеспечение авиационного производства [Текст] / Г.Б. Строганов, Ю.Г. Роик. – М.: Машиностроение, 1991. – 368 с.

Поступила в редакцию 20.02.2017

### Розроблення математичної моделі процесу поверхневого наклепу ударами кульок

Проведено моделювання процесу поверхневого наклепу ударами кульок в залежності від швидкості удару, діаметра кульки і кратності удару. Досліджено вплив кратності удару на показник поверхневої багатударної деформації. Визначено залежність стискаючих напружень в поверхневому шарі від швидкості удару кулькою.

**Ключові слова:** модель процесу поверхневого наклепу, динамічне зміцнення, швидкість удару, діаметр кульки, кратність удару, показник поверхневої деформації, що стискають напруги.

## **The Development of Mathematical Model of the Surface Hardening Process by Ball Hitting**

The simulation of the process of surface hardening by ball hitting, depending on the impact speed, ball diameter and stroke ratio. The influence of the multiplicity of impact on the rate of multi impact surface deformation. The dependence of the compressive stress in the surface layer of the impact speed of the ball was obtained.

**Keywords:** model of a surface hardening, hardening of dynamic, impact speed, ball diameter, the multiplicity of strike rate of surface deformation, compressive stresses.

### **Сведения об авторах:**

**Юрий Вениаминович Дьяченко** – канд. техн. наук, доцент каф. 104 «Технологии производства летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

**Вячеслав Викторович Коллеров** – канд. техн. наук, доцент каф.104 «Технологии производства летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

**Трифонов Олег Валериевич** – к. техн. наук, доцент каф. 104 «Технологии производства летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

**Ирина Алексеевна Воронько** – ассистент каф. 104 «Технологии производства летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

**Вадим Олегович Гарин** – к. техн. наук, старший преподаватель каф. 104 «Технологии производства летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».